



MODEL EKONOMSKE OPTIMIZACIJE IZBORA GRAĐEVINSKE MEHANIZACIJE ZA ZEMLJANE RADOVE PRIMENOM PRISTUPA LINEARNOG PROGRAMIRANJA

AN ECONOMICAL OPTIMIZATION MODEL FOR EARTHMOVING EQUIPMENT SELECTION USING LINEAR PROGRAMMING APPROACH

MARKO DRAGOJEVIĆ¹, ABEL B. DURAN², NATAŠA PRAŠČEVIĆ³

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, markomionica@gmail.com

² Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, aduran@grf.bg.ac.rs

³ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, natasa@grf.bg.ac.rs

Rezime: Cilj ovog istraživanja je određivanje modela ekonomske optimizacije izbora građevinske mehanizacije za zemljane radove - iskop zemlje treće kategorije korišćenjem pristupa linearnog programiranja. U građevinskoj praksi ovakav model ekonomske optimizacije se često naziva i uži izbor građevinske mehanizacije. Kako se prava vrednost ovakvog modela ogleda u njegovoj primeni na konkretnim građevinskim projektima, u okviru ovog rada isti je razvijen na konkretnom primeru iz prakse, a koji podrazumeva da se radovi realizuju u okviru projekta izgradnje stambeno-poslovnog kompleksa površine $P=30.000,0 \text{ m}^2$ u planiranom trajanju od $\tau=45$ dana. Optimizacija je izvršena tako da tehnološki proces teče fluidno, bez značajnih zastoja, odnosno na način koji obezbeđuje maksimalnu uposlenost građevinske mehanizacije uz adekvatno zadovoljenje ekonomskih parametara produktivnosti i ekonomičnosti. Nakon razmatranja više potencijalnih kombinacija kao optimalana izabrana je kombinacija broj 3, odnosno dva dozera, četiri utovarivača i deset kamiona kiperi. Pri ovakvom izboru jedinična cena radova iznosi $34,02 \text{ €/m}^3$, dok je praktični učinak $203,25 \text{ m}^3/\text{h}$. Ukupna cena svih radova je $3.061.800,00 \text{ €}$, a ukupno trajanje iskopa iznosi $44,3$ dana.

Ključne reči: građevinska mehanizacija, zemljani radovi, ekonomska optimizacija, linearno programiranje.

Abstract: The aim of this research is determination of an economical optimization model for earthmoving equipment selection using linear programming approach. In construction practice model along these lines is often called shortlist of construction equipment. Bearing in mind that actual practical value of the following model is in its application on particular construction projects, in this paper aforementioned model is developed and proved on the practical example, which implies that works are being done within construction project of the residential-commercial building complex with total area of $P=30.000,0 \text{ m}^2$ during the period of $\tau=45$ days. Optimization has been done in a manner which guarantees that technological process flows fluently, without significant congestions, or in other words, in a way that ensures employment maximization of the construction equipment, while in the same time economical and productivity parameters are adequately fulfilled. After considering several potential combinations, a combination No. 3 have been selected as optimal one i.e. two bulldozers, four loaders and ten dump trucks. With aforementioned choice, the unit price of the works is $34,02 \text{ €/m}^3$, while practical productivity is $203,25 \text{ m}^3/\text{h}$. The total cost of all works amounts $3.061.800,00 \text{ €}$, and the total duration of the excavation works is $44,3$ days.

Keywords: construction equipment, earthworks, economical optimization, linear programming.

1. UVOD

Optimizacija izbora građevinske mehanizacije na investicionim projektima predstavlja kreativan posao sa potencijalom značajne uštede finansijskih sredstava. Osnovni cilj ovog zadatka jeste da izbor vrste, tipa i broja građevinskih mašina bude urađen na način koji će obezbediti da se planirani obim radova završi u ugovorenom vremenskom roku, a da se pri tome direktni troškovi angažovane mehanizacije što je moguće više umanje i ostavi prostor za ostvarivanje maksimalnog profita. Naravno, kako svaka vrsta posla nosi pojedine specifičnosti u vidu uslova i ograničenja, poznavanje prirode posla i tehnologije izvođenja radova na gradilištu predstavlja jedan od glavnih preduslova za uspešnu realizaciju jednog tako složenog zadatka.

Građevinske firme se svakodnevno susreću sa ovakvim i sličnim problemima prilikom konkurisanja za nove poslove, posebno kada se isti realizuju na tržištu gde postoji veliki broj konkurentnih ponuđača i gde se podrazumeva realizacija većeg broja projekata sa značajnim obimom posla koji uključuje mehanizovani rad. Kako se ukupna vrednost ponude jedne građevinske firme u slučaju obimnih zemljanih radova u velikoj meri zasniva na troškovima mehanizacije kvalitetno rešenje prethodno navedenog problema jeste jedan od preduslova za uspešno dobijanje posla i ostvarivanje profita.

Kombinacija različitih vrsta i tipova mašina, kao i njihov broj, imaju presudan uticaj na kvalitet tehnološkog procesa koji će biti uspostavljen. Da bi kombinacija mašina bila optimalna, potrebno je da bude definisana kroz razmatranje većeg broja varijantnih rešenja od kojih se kao optimalno usvaja ono koje u najboljoj meri zadovolji unapred zadate parametre.

Metoda linearnog programiranja je pogodna za rešavanje jednog ovakvog problema jer se egzaktno može postaviti funkcija cilja i uslovi ograničenja i u skladu sa njima izabrati optimalna kombinacija iz raspoloživog voznog parka. Alternativa ovoj metodi bi bila primena pristupa kombinatorne optimizacije kada bi od svih tipova mašina u okviru jedne kombinacije šireg izbora izabrali onu najpovoljniju, a nakon toga i najpovoljniju kombinaciju. U svakom slučaju neophodno je matematički definisati merilo vrednosti određene kombinacije kako bi se zaista izabrala ona koja je optimalna.

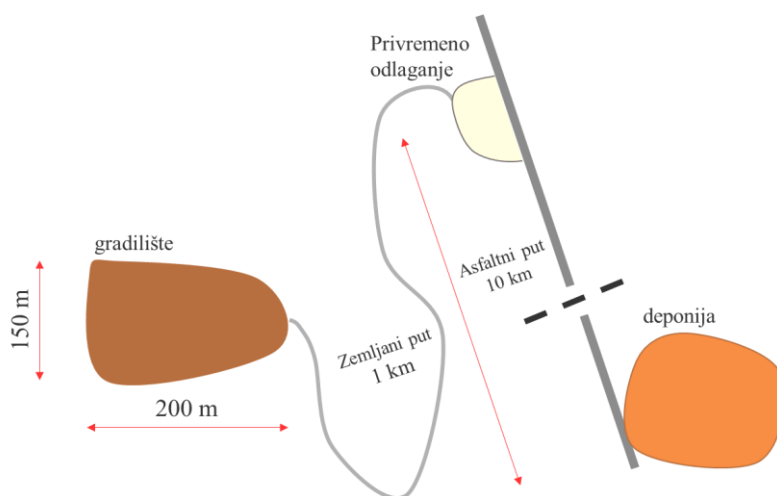
2. OBIM POSLA I POTREBNI PRAKTIČNI UČINAK

Građevinska firma izvodi zemljane radove u okviru projekta stambeno-poslovnog objekta, na parceli površine $P = 30.000,0 [m^2]$ (dužine $a = 200 [m]$ i širine $b = 150 [m]$), a planirano trajanje radova je $\tau = 45 [dan]$. Zemljani radovi podrazumevaju iskop zemlje treće kategorije, gde je prosečna dubina iskopa $d = 3,0 [m]$. Prema tome, obim radova (Q) i potrebna produktivnost, odnosno praktični učinak ($U_{p,potr.}$) iznose:

$$Q = P * d = 30.000,0[m^2] * 3,0[m] = 90.000,0[m^3] \quad (1)$$

$$U_{p,potr.} = \frac{Q}{\tau} = \frac{90.000,0[m^3]}{45[dan] * 10[\frac{h}{dan}]} = 200,0[\frac{m^3}{h}] \quad (2)$$

Na slici 1 prikazana je šema transporta zemljanog materijala od gradilišta do deponije udaljene 11 km. Prvu deonicu puta čini zemljani put u dužini od 1 km, do mesta za privremeno odlaganje materijala, dok je druga deonica puta dobro nosivi asfaltirani kolovoz dužine 10 km.



Slika 1: Šema transporta

3. PRELIMINARNA SELEKCIJA GRAĐEVINSKE MEHANIZACIJE (ŠIRI IZBOR)

Prvi korak prilikom optimizacije izbora građevinske mehanizacije, konkretno u ovom slučaju građevinskih mašina koje će se koristiti za iskop zemlje treće kategorije, jeste razlaganje tehnološkog procesa na logične celine, odnosno radne operacije. Svaka radna operacija je definisana tako da se može obaviti pomoću jedne od raspoloživih mašina. [3] Kako je potrebno izvršiti iskop i transport materijala na deponiju, to će tehnološki proces biti podeljen na sledeće radne operacije:

- iskop zemljanog materijala;
- utovar na transportno sredstvo;
- transportovanje utovarenog materijala na deponiju (uključujući i unutrašnji i spoljašnji transport) i
- istovar materijala.

Nakon jasnog definisanja, potrebno je predložiti nekoliko različitih kombinacija mašina koje su adekvatne za obavljanje svake od navedenih operacija. Različitim kombinacijama se smatraju dve kombinacije kod kojih se makar jedna mašina razlikuje po vrsti ili tipu. U nastavku je dat tabelarni prikaz prvog koraka u sprovođenju ekonomske optimizacije izbora građevinske mehanizacije gde je iskop zemlje podeljen na navedene operacije i gde su date 4 različite kombinacije mašina koje mogu zadovoljiti potrebe tehnološkog procesa.

Tabela 1: Širi izbor građevinske mehanizacije

Aktivnost	Zemljani radovi – Iskop zemlje III kategorije i transport na deponiju				
Kombinacija	Mašina	Radne operacije			
		Iskop	Utovar	Unutrašnji transport	Spoljašnji transport i istovar
1.	Bager	•	•		
	Kamion kiper			•	•
2.	Bager	•			
	Utovarivač		•		
	Kamion kiper			•	•
3.	Dozer	•			
	Utovarivač		•		
	Kamion kiper			•	•
4.	Skreper	•		•	
	Utovarivač		•		
	Kamion kiper				•

4. ULAZNI PARAMETRI GRAĐEVINSKIH MAŠINA

U narednoj tabeli prikazani su ulazni parametri građevinskih mašina od kojih je izabrana optimalna kombinacija. Ovi parametri podrazumevaju vrstu i tip mašine, praktični učinak, produktivnost i koštanje radnog sata. [1]

Tabela 2: Podaci o mašinama

R.br.	Kod		Mašina	Tip	K _{h_{ij}} [€/h]	P _{ij} [-]	U _{p_{ij},k} [m ³ /h]			
	i	j					Kombinacija k			
							1	2	3	4
1	1	1	Bager	Caterpillar 245B 268kW	122,21	0,90	55,0	70,0		
2		2	Bager	Caterpillar 235C 186kW	86,97	0,70	30,0	40,0		
3	2	1	Dozer	Caterpillar D9N 276kW	123,30	0,95			130,0	
4		2	Dozer	Caterpillar D8N 212kW	98,45	0,70			115,0	
5	3	1	Skreper	Caterpillar 627G 294kW	178,54	0,70				30,0
6		2	Skreper	Caterpillar 637G 373kW	186,23	0,80				35,0
7	4	1	Utovarivač	Caterpillar D7R 171kW	86,67	0,70		90,0	70,0	100,0

8		2	Utovarivač	Caterpillar 824C 235kW	101,82	0,75		100,0	75,0	110,0
9	5	1	Kiper	MAN 18224LK 162kW	52,81	0,70	20,0	20,0	20,0	30,0
10		2	Kiper	MAN 26240 177kW	52,97	0,85	25,0	25,0	25,0	35,0

5. DEFINISANJE KRITERIJUMSKE FUNKCIJE, USLOVA OGRANIČENJA I REŠENJE PROBLEMA (UŽI IZBOR MAŠINA)

Funkcija cilja (kombinacija k)

$$\min F = \sum_{i=1, N_k; j=1, n_i} \frac{Kh_{ij}}{p_{ij} \cdot Up_{ij,k}} \cdot X_{ij} \left[\frac{\text{€}}{m^3} \right] \quad (3)$$

Kh_{ij} – koštanje radnog sata mašine ; p_{ij} – pouzdanost mašine ; $Up_{ij,k}$ – praktični učinak mašine za kombinaciju k ; X_{ij} – broj mašina ; N – broj različitih vrsta mašina u kombinaciji k

Uslovi ograničenja (Kombinacija k)

$$\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \cdot Up_{ij,k} \cdot X_{ij} \geq Up, \text{potr.}, i = 1, N \left[\frac{m^3}{h} \right] ; X_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

U formulama (3) i (4) isključuju se mašine koje ne učestvuju u kombinaciji. [2]

Kombinacija 1

$$\min F_{k=1} = 2,47 X_{11} + 4,14 X_{12} + 3,77 X_{51} + 2,49 X_{52} \quad (5)$$

$$0,9 \cdot 55 X_{11} + 0,7 \cdot 30 X_{12} \geq 200 ; 0,7 \cdot 20 X_{51} + 0,85 \cdot 25 X_{52} \geq 200 \quad (6)$$

Rešenje: $X_{11} = 5$; $X_{12} = 0$; $X_{51} = 0$; $X_{52} = 10$; $\min F_{k=1} = 37,25$

Kombinacija 2

$$\min F_{k=2} = 1,94 X_{11} + 3,11 X_{12} + 1,38 X_{41} + 1,36 X_{42} + 3,77 X_{51} + 2,49 X_{52} \quad (7)$$

$$0,9 \cdot 70 X_{11} + 0,7 \cdot 40 X_{12} \geq 200 ; 0,7 \cdot 90 X_{41} + 0,75 \cdot 100 X_{42} \geq 200$$

$$0,7 \cdot 20 X_{51} + 0,85 \cdot 25 X_{52} \geq 200 \quad (8)$$

Rešenje: $X_{11} = 4$; $X_{12} = 0$; $X_{41} = 0$; $X_{42} = 3$; $X_{51} = 0$; $X_{52} = 10$; $\min F_{k=2} = 36,74$

Kombinacija 3

$$\min F_{k=3} = 1,00 X_{21} + 1,22 X_{22} + 1,77 X_{41} + 1,81 X_{42} + 3,77 X_{51} + 2,49 X_{52} \quad (9)$$

$$0,95 \cdot 130 X_{21} + 0,7 \cdot 115 X_{22} \geq 200 ; 0,7 \cdot 70 X_{41} + 0,75 \cdot 75 X_{42} \geq 200$$

$$0,7 \cdot 20 X_{51} + 0,85 \cdot 25 X_{52} \geq 200 \quad (10)$$

Rešenje: $X_{21} = 2$; $X_{22} = 0$; $X_{41} = 3$; $X_{42} = 1$; $X_{51} = 0$; $X_{52} = 10$; $\min F_{k=3} = 34,02$

Kombinacija 4

$$\min F_{k=4} = 8,50 X_{21} + 6,65 X_{22} + 1,24 X_{41} + 1,23 X_{42} + 2,51 X_{51} + 1,78 X_{52} \quad (11)$$

$$0,7 \cdot 30 X_{31} + 0,8 \cdot 35 X_{32} \geq 200 ; 0,7 \cdot 100 X_{41} + 0,75 \cdot 110 X_{42} \geq 200$$

$$0,7 \cdot 30 X_{51} + 0,85 \cdot 35 X_{52} \geq 200 \quad (12)$$

Rešenje: $X_{31} = 0 ; X_{32} = 8 ; X_{41} = 0 ; X_{42} = 3 ; X_{51} = 0 ; X_{52} = 7 ; \min F_{k=4} = 69,35$

$$F^* = \min \{F_{k=1} ; F_{k=2} ; F_{k=3} ; F_{k=4}\} = F_{k=3} = 34,02 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] \quad (13)$$

$$CENA_{radova} = Q \cdot F^* = 90.000,0 [\text{m}^3] \cdot 34,02 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = 3.061.800,00 [\text{€}] \quad (14)$$

$$Up_{radova} = \min_i \left\{ \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \cdot Up_{ij,k=3} \right\} = \min \{2 \cdot 0,95 \cdot 130 ; 3 \cdot 0,70 \cdot 70 + 1 \cdot 0,75 \cdot 75 ; 10 \cdot 0,85 \cdot 25\} \quad (15)$$

$$Up_{radova} = \min \{247 ; 203,25 ; 212,5\} = 203,25 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

$$\tau_{radova} = \frac{Q}{Up_{radova}} = \frac{90.000,0 [\text{m}^3]}{203,25 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]} = 442,80 [\text{h}] = \frac{442,80 [\text{h}]}{10 \left[\frac{\text{h}}{\text{dan}} \right]} = 44,3 \square 45 [\text{dan}] \quad (16)$$

6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Kombinacija 3 ima optimalnu (minimalnu) vrednost definisane funkcije cilja i zadatih uslova ograničenja. Iz ove činjenice proizilazi da će procenjena cena radova na iskupu zemlje treće kategorije iznositi 34,02 [€/m³], a da će za to biti potrebno da se angažuju dva dozera, četiri utovarivača i deset kamiona kipera. Pri ovom izboru praktični učinak čitavog tehnološkog procesa iznosi 203,25 m³/h, dok će ukupno trajanje radova biti 44,3 dana. Ukupna cena iskopa je 3.061.800,00 €.

Jedan ovakav model sa sobom povlači niz slučajnih veličina koje treba unapred proceniti tako da se ostvarene vrednosti mogu značajno razlikovati. Preporuka je da se model permanentno popravlja tako što se uvidom u realno stanje na terenu i merenjem vrednosti parametri modela mogu preciznije odrediti. Najosetljiviji među njima su oni koji utiču na ostvareni učinak mašine, a to su konkretni uslovi na terenu i u tlu i pouzdanost rada mašine.

Kao ključno ograničenje ovog modela nameće se nemogućnost sagledavanja svih realnih uslova na terenu i nedovoljna tačnost ulaznih podataka. U slučaju promene nekih od ovih parametara model bi logično davao drugačije rezultate. Neophodno je ispitati njegovu osetljivost u zavisnosti od promene svakog od relevantnih parametara kako bi se pronašli oni koji imaju najveći uticaj i kako bi se istima posvetila posebna pažnja u smislu pažljivijeg osmatranja i beleženja realnih vrednosti.

Doprinos rada se ogleda u tome što se na potpuno analogan način isti model može prilagoditi bilo kom konkretnom problemu nezavisno od vrste projekta, kompleksnosti operacija, raspoložive mehanizacije i sl. Model predstavlja odličnu osnovu za izradu softvera sa kvalitetnim grafičkim interfejsom u kome bi algoritmi u pozadini omogućili inženjerima u praksi i građevinskim firmama na projektima da u rekordno kratkom roku nađu najisplativiju kombinaciju građevinskih mašina koja će rešiti postavljeni zadatak.

Buduća istraživanja bi podrazumevala testiranje ovog modela u konkretnim uslovima kao i anketiranje inženjera nakon primene i komentarisane rezultata. Povratne informacije i sugestije bi bile ključne za razvijanje konačnog modela koji bi našao široku primenu u praksi i omogućio da se građevinski projekti realizuju kvalitetno, ekonomično i efikasno.

7. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansijskoj podršci kroz projekte III 47014 i TR - 36038.

LITERATURA

- [1] gramak.com/, preuzeto 22. maj 2019
- [2] Nikola Klem, Miloš Kovačević, Nataša Prašćević, Đorđe Nedeljković (2010). Osnove programiranja u MATLAB-u. Građevinska knjiga. ISBN 978-86-395-0609-4
- [3] Serafim Opricović (1998). Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. ISBN 86-80049-82-4
- [4] Slobodan Mirković (2005). Građevinska mehanizacija. Građevinska knjiga. ISBN 86-395-0434-2